

## **СРЕДНЯЯ И ВЕРХНЯЯ АТМОСФЕРА: ПРОБЛЕМЫ, ТРЕНДЫ, ЧАСТИЦЫ**

**О. С. Угольников**

*Институт космических исследований РАН*

С середины XX в. в атмосфере Земли начали происходить быстрые изменения, которые ранее не фиксировались или не могли быть замечены ввиду скромных технических возможностей того времени. Самые масштабные и заметные из них — рост средней приземной температуры («глобальное потепление») и уменьшение общего содержания озона — в перспективе несли потенциальную угрозу для жизни на Земле. Наряду с ними обнаруживались и другие процессы, такие, как увеличение содержания ряда малых газовых примесей, а также различных твердых и жидких частиц. Все это охватывало не только приземные, но и высокие слои атмосферы. Быстрый и масштабный характер изменений указывал на их тесную взаимосвязь, а также на вероятные антропогенные причины, что обуславливало необходимость детального изучения и контроля состава всех слоев атмосферы. В настоящей лекции описывается современное состояние анализа долговременных трендов характеристик стратосферы и мезосферы Земли.

---

© Угольников О. С., 2020

# MIDDLE AND UPPER ATMOSPHERE: PROBLEMS, TRENDS, PARTICLES

O. S. Ugolnikov

*Space Research Institute*

Fast changes in Earth's atmosphere had started in the middle of 20th century. They didn't occur before or possibly were below the registration level for that time and technical possibilities. Most significant and noticeable effects as increase of near-ground temperature ("global warming") and decrease of total ozone column density were potentially dangerous for life on Earth. Along with these processes, the increase of abundance of small gas components and solid and liquid particles was detected. This happened not only near the ground, but also in upper atmospheric layers. Fast and significant character of these changes pointed to their interrelation and possible anthropogenic reasons. This makes the detailed atmospheric composition control necessary in all atmospheric layers. This work describes the present state of long-term trends in stratosphere and mesosphere of the Earth.

## Парниковый эффект: две стороны медали

В XIX в., по мере уточнения величины расстояния до Солнца и его светимости, а также альбедо Земли, стало понятно, что условия на поверхности нашей планеты не соответствуют простому закону теплового баланса, средняя температура превосходит равновесное значение примерно на 35 К. Физическую суть процесса, который может существенно увеличить температуру поверхности без привлечения дополнительных источников энергии, впервые описал Жан-Батист Жозеф Фурье в 1827 г. [1]. Эффект, который теперь известен человечеству под названием «парниковый», состоял в частичном блокировании оттока тепла от какого-либо тела в окружающей его среде. Очевидно, что в случае Земли в качестве такой среды выступала ее газовая оболочка — атмосфера.

В 1861 г. английский физик Джон Тиндаль [2] проводил опыты по пропусканию инфракрасных (тепловых) лучей сквозь различные газы, имевшиеся в его лаборатории. Большая их часть, включая молекулярный азот и кислород, оказались совершенно прозрачными. Уже почти не надеясь на позитивный итог эксперимента, Тиндаль взял образец «угольного газа» — топлива, использовавшегося в бунзеновских горелках того времени и состоявшего из смеси метана и угарного газа. Эта смесь блокировала инфракрасное излучение

практически полностью. Похожий результат Тиндаль получил для продуктов горения «угольного газа» — водяного пара  $\text{H}_2\text{O}$  и двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ . Теперь мы знаем, что именно эти два газа и вносят определяющий вклад в парниковый эффект на Земле.

В самом конце XIX в. шведский физик Сванте Аррениус [3] связал исторические периоды оледенения на Земле с вариациями содержания углекислого газа в атмосфере. Этого газа в атмосфере сравнительно немного, порядка 0.03 %, и по вкладу в парниковый эффект он уступает водяному пару. Тем не менее нагрев поверхности Земли, вызванный углекислым газом, мог быть достаточно значительным, чтобы усилить испарение воды в океанах и тем самым увеличить уже суммарный парниковый эффект. Эта положительная обратная связь определяет резкую чувствительность средней температуры поверхности Земли к вариациям содержания диоксида углерода. Из нее сразу же следовало, что рост промышленности и увеличение выбросов  $\text{CO}_2$  в атмосферу может вызвать дальнейшее потепление климата, которое, начиная с какого-то уровня, может стать опасным для жизни на Земле. Несколько десятилетий масштаб возможного потепления недооценивался, но со второй половины XX в. средняя температура перешла к стадии быстрого роста, достигающего 0.2 К за десятилетие.

Рост содержания диоксида углерода и вызванный им парниковый эффект в настоящее время — одна из самых актуальных проблем, стоящих перед всем человечеством, об этом написано большое количество книг и статей. В настоящей работе мы коснемся на первый взгляд неожиданного аспекта данной проблемы в приложении к более высоким слоям атмосферы Земли. В условиях существенно меньшей плотности атмосферы (и  $\text{CO}_2$  в частности) диоксид углерода может оказаться оптически тонким в своих инфракрасных полосах, в том числе на длине волны около 15 мкм — основной полосе с точки зрения парникового эффекта, совпадающей по длине волны с максимумом теплового излучения Земли. В этом случае преобладающим может стать противоположный процесс — излучение молекул  $\text{CO}_2$ , возбужденных в результате столкновений с другими частицами атмосферы. Эффект получил название «радиативное выхолаживание» и может приводить, как ни странно, к уменьшению температуры высоких слоев атмосферы [4, 5]. Он действительно был открыт, причем первые количественные оценки [6] (как потом выяснилось, существенно завышенные) приводили к величине порядка  $-1$  К/год, что по модулю в 50 раз превосходило темп глобального

потепления у поверхности Земли! Если бы последнее происходило с такой скоростью, можно было бы говорить об угрозе конца земной цивилизации в самое ближайшее время.

Более точные оценки темпа уменьшения температуры (как экспериментальные, так и модельные, см., например, [7, 8]) зависят от сезона и высоты, достигая  $-0.2$  К/год в летней мезосфере высоких широт. Как известно, за счет быстрого восходящего переноса и адиабатического охлаждения эта область и так является самой холодной в атмосфере и вообще на Земле, температура там может опускаться ниже  $130\text{--}140$  К. Причиной дальнейшего охлаждения мезосферы считается двуокись углерода, концентрация которой там растет примерно на  $0.5\%$  в год, что быстрее, нежели у поверхности Земли [9].

Похолодание мезосферы приводит к весьма существенным эффектам. Быстрое уменьшение плотности воздуха с высотой, соответствующее низким температурам, означает разрежение более высокого атмосферного слоя — термосферы. Это может сказываться, в частности, на движении низкоорбитальных спутников, тормозящихся в верхних слоях атмосферы. Измерения температуры различных слоев атмосферы стало одной из основных задач нескольких орбитальных миссий, в частности, эксперимента SABER (Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry [10]) на борту спутника TIMED (Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics and Dynamics, NASA), методика которого позволяет восстанавливать вертикальные профили температуры с высоким разрешением (порядка  $0.4$  км).

В начале XXI в. похолодание верхних слоев атмосферы несколько замедлилось, причины этого обсуждаются далее. Тем не менее, как видно на рис. 1, построенном по данным SABER для окрестностей Москвы на период июнь—июль в 2002—2019 гг., негативный тренд температуры сохраняется в большинстве слоев не только мезосферы, но и стратосферы.

Тренд исчезает только вблизи мезопаузы, на высотах  $82\text{--}87$  км. Этот факт сам по себе интересен, ведь именно там летом возможно появление ледяных кристаллов, образующих летние полярные мезосферные или серебристые облака. Они не наблюдались в средних северных широтах до последних десятилетий XIX в., а в настоящее время видны регулярно в июне и июле. Данный факт часто указывается как наглядное свидетельство охлаждения верхней летней мезосферы. Тем не менее сейчас температурные тренды в этой области атмосферы незаметны, а связь роста частоты появления облаков с

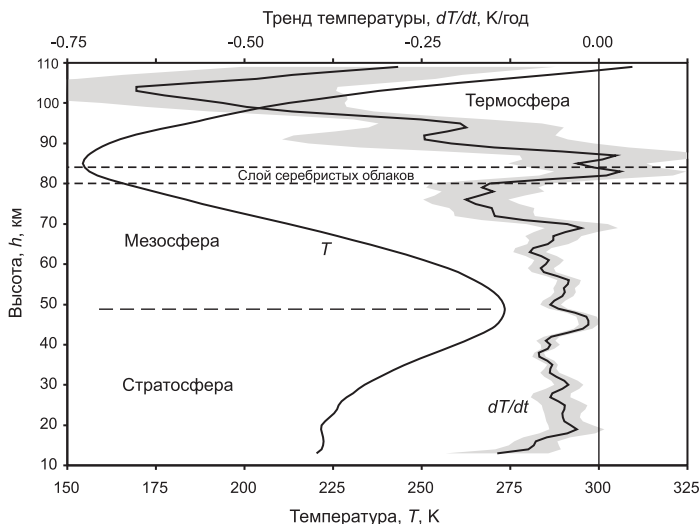


Рис. 1. Средний профиль температуры июня—июля и ее тренд в 2002—2019 гг. в окрестностях Москвы ( $\pm 3^\circ$  по широте и  $\pm 15^\circ$  по долготе) по спутниковым данным TIMED/SABER

температурой еще недостаточно хорошо изучена и характеризуется рядом противоречий (см., например, [11]). Этот вопрос будет рассматриваться в четвертой части настоящей работы.

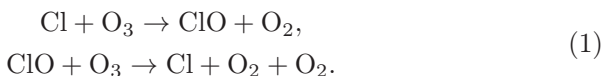
## Озоновый щит: возвращение в новом облики?

В 80-е гг. XX в., в то же самое время, когда глобальное потепление заявило о себе в полную мощь, вскрылся еще один, еще более тревожный аспект влияния человека на состав атмосферы и условия жизни на Земле. Ежегодно над Антарктидой в сентябре—декабре (весенние месяцы для южного полушария) стало наблюдаться существенное, до 30—40 %, уменьшение общего содержания озона  $O_3$  [12], которое с подачи журналистов вошло в обиход под названием «озоновая дыра».

Озон — малая газовая примесь в атмосфере Земли, большая часть которого располагается в стратосфере, на высотах от 10—12 до 40 км. Но и там его вклад составляет всего несколько миллионов частей по объему. Тем не менее этого оказывается достаточно, чтобы полностью заблокировать несовместимое с жизнью солнеч-

ное ультрафиолетовое излучение с длиной волны меньшей 290 нм и существенно ослабить более мягкий ультрафиолет в диапазоне 290—310 нм. Озон и его расположение в атмосфере вполне можно назвать «чудом Земли» или даже локальным проявлением антропоного принципа наряду с его глобальными факторами вроде значений мировых констант, оптимальных для возникновения галактик, звезд и, в конце концов, обитаемых планет. Озон — сильный окислитель и ядовитый газ, его присутствие в тропосфере в больших количествах представляло бы опасность. Он выполняет свои защитные функции в стратосфере, над слоем обитания живых организмов.

Причины сокращения количества озона были известны уже за 10 лет до появления «дыры» [13]. Как и для многих атмосферных изменений конца XX в., здесь не обошлось без вмешательства человека, а точнее — фреонов, газов, производимых для холодильных установок. Эти соединения углерода с галогенами отличаются высокой химической стойкостью, а попав в стратосферу, выпускают туда под действием солнечного излучения свободные атомы хлора и брома. Те, в свою очередь, каталитически разрушают озон:



Сам атом галогена при этом не уходит из системы, уничтожая за время жизни сотни тысяч молекул озона. В отличие от ситуации с парниковым эффектом знание этой схемы позволило человечеству принять быстрые меры. Несмотря на противодействие незаинтересованных сторон (особо отличилась американская компания DuPont, производившая фреоны и пытавшаяся поставить под сомнение эффективность хлорного цикла разрушения озона в научной литературе), были приняты Венская конвенция (1985) и Монреальский протокол (1987), ограничивающие и далее запрещающие производство хлор- и бромсодержащих фреонов. Они были заменены более дорогими, но безопасными для озона фторуглеводородами. Свободный фтор в атмосфере быстро забирает водород из молекул воды, образуя достаточно инертный фтороводород.

Принятые меры дали эффект через 10 лет: уменьшение содержания озона в атмосфере прекратилось, и в настоящее время его тренды примерно нулевые. Однако о восстановлении озонового слоя говорить еще рано, — выброшенные за многие десятилетия хлор и бром по-прежнему остаются в стратосфере. По прогнозам, возвращение озонового слоя к доиндустриальному уровню может произойти

только в середине XXI в. При этом его свойства и вертикальное распределение могут быть совершенно иными. Это определяется всеми изменениями, которые произойдут в атмосфере к этому времени, в частности — ростом содержания парниковых газов.

Здесь необходимо пояснить, почему «озоновая дыра» возникла именно в высоких южных широтах. Этому способствуют очень низкие зимние температуры в стратосфере над Антарктидой. Холодный воздух опускается вниз, образуя устойчивый полярный стратосферный вихрь, блокирующий приток воздуха с низких широт, где образуется озон. В условиях полярной ночи накопленный за лето озон сохраняется, но с началом весны распадается под действием солнечных лучей. Этот процесс усиливают холодные полярные стратосферные облака, содержащие соединения хлора и азота и выпускающие их окиси весной в атмосферу. Озоновая депрессия исчезает лишь к концу весны с распадом полярного вихря и испарением стратосферных облаков.

В высоких широтах северного полушария эти процессы менее интенсивны вследствие менее холодной стратосферы. Однако, как было описано в предыдущей главе и видно на рис. 1, под действием парниковых газов в стратосфере наблюдается отрицательный температурный тренд, поэтому возникновение озоновых депрессий в настоящем и будущем возможно и там, особенно при отсутствии контроля за выбросом галогеносодержащих соединений.

Со своей стороны озон также влияет на тепловые тренды атмосферы. Модельные расчеты [7, 14] показывают, что именно прекращение разрушения стратосферного озона на рубеже XX и XXI вв. стало фактором, замедлившим похолодание мезосферы и вообще остановившим его вблизи мезопаузы. Это же подтверждают и наблюдения [8].

Помимо вышеперечисленного тепловая структура тропосферы и стратосферы в существенной степени зависит от наличия в ней твердых и жидких частиц, которое, в свою очередь, также определяется содержанием малых газовых примесей, в том числе антропогенного происхождения. Об этом факторе речь пойдет в следующей части работы.

## **Земля станет Венерой?**

Наряду с «большими ледниковыми периодами», очевидно, связанными с вариациями величины парникового эффекта и ставшими

целыми эпохами в истории нашей планеты, известны сравнительно кратковременные, но также весьма заметные похолодания на поверхности Земли. Случались они существенно чаще, и некоторые из них произошли недавно, сохранив после себя описания очевидцев. Заметную роль в истории нашей страны сыграли аномальные холода 1601—1603 гг., когда лето было коротким и дождливым, а снег мог держаться более чем по полгода. Климатические изменения вызвали неурожай и голод и фактически подтолкнули начало сложного периода в нашей истории, известного как Смутное время.

Сильные похолодания длительностью 3—5 лет не могут объясняться вариациями содержания парниковых газов, имеющих существенно большее время жизни в атмосфере. Другие возможные причины так называемых «малых ледниковых периодов» — вариации океанических течений, тренды солнечной активности — также привели бы к более длительным климатическим явлениям.

Самое сильное кратковременное похолодание на Земле в последние несколько веков случилось в 1816 г., названном потом «годом без лета», а в США — «тысяча восемьсот насмерть замерзшим» («eighteen hundred and frozen to death»). И лишь век спустя это похолодание связали с сильнейшим из всех наблюдавшихся на Земле извержением вулкана Тамбора [15]. Падение температуры было вызвано блокированием солнечных лучей вулканическим пеплом и другими продуктами извержения. Такое же объяснение (извержение вулкана Уайнапутина в Южной Америке в 1600 г.) было позже дано и холодным годам на Руси в начале XVII в.

Что интересно, сам темный пепел непосредственно наблюдался только первое время после извержения Тамборы, достаточно быстро выпадая на Землю. Гораздо дольше в атмосфере оставался светлый аэрозоль, придававший необычную пурпурную окраску вечерней и утренней заре. Еще большее внимание на него обратили в конце XIX в., после другого сильного извержения вулкана — Кракатау — в 1883 г. [16]. Связь с извержением казалась очевидной, но при этом дневное ясное небо выглядело по-обычному, визуально свет Солнца не казался ослабленным. Что это за субстанция, из чего она состоит и, главное, за счет чего остается в атмосфере в течение нескольких лет — оставалось непонятным еще почти целый век.

Исходя из условий освещения Солнцем во время сумерек, можно было сделать вывод, что аэрозоль вулканического происхождения находится на высотах до 15—20 км, как мы теперь понимаем — в стратосфере. Долгое время эти слои были совершенно недоступны



для каких-либо исследований, первые контактные измерения с борта аэростата состоялись в 60-е гг. XX в. [17]. Еще через 10 лет стал понятен химический состав аэрозольных частиц [18], он оказался аналогичным облакам в атмосфере Венеры. Частицы представляли собой капли концентрированного раствора серной кислоты! Хорошо отражая солнечный свет, они уменьшали его поток у поверхности Земли и тем самым охлаждали нашу планету. В научной литературе эффект иногда называли «антипарниковым».

В отличие от полярных стратосферных облаков, появляющихся только вблизи полюсов и активно способствующих уничтожению озона, сульфатный аэрозоль может существовать и при более высоких температурах. Это позволяет ему охватывать большую часть стратосферы над поверхностью Земли, создавая эффект глобального похолодания после мощных извержений. Источником аэрозоля являлся вулканический сернистый газ  $\text{SO}_2$ . При достаточной мощности выброса он попадает в стратосферу, где вступает в реакции с атомарным кислородом  $\text{O}$ , озоном  $\text{O}_3$  и гидроксидом  $\text{OH}$ , образуя серную кислоту.

По стечению обстоятельств первые десятилетия активных аэро-статных исследований стратосферного аэрозоля [19] пришлось на эпоху частых крупных извержений вулканов: Агунг, Эль-Чичон и, наконец, Пинатубо — самое мощное извержение XX в., также вызвавшее ощутимое падение средней температуры на поверхности Земли. Эффект от каждого извержения длился по 5—6 лет. В короткие интервалы между этими периодами было отмечено, что концентрация аэрозоля не падает до нуля, оставаясь на некотором примерно постоянном уровне [20]. Детальное изучение этого фонового аэрозоля стало возможным в самом конце XX в., когда стратосфера очистилась от продуктов выброса вулкана Пинатубо.

Первое десятилетие XXI в. проявило рост содержания фонового аэрозоля [21], что стало предметом оживленных дискуссий о возможных антропогенных причинах и этого явления. Действительно, сернистый газ также присутствует в промышленных выбросах, которые в последнее время существенно возросли, особенно в странах Юго-Восточной Азии [22]. Еще одним, даже более вероятным источником мог стать карбонилсульфид  $\text{OCS}$  [23]. Анализ антарктических льдов показал, что в настоящее время содержание этой примеси существенно больше, чем в доиндустриальную эпоху [24].

Что интересно, далеко не всеми учеными данная ситуация воспринималась как катастрофическая или хотя бы опасная. Пауль

Крутцен, ведущий специалист в области атмосферной химии, работа которого цитируется абзацем выше, предлагал даже искусственно увеличивать выбросы сернистого газа в стратосферу, чтобы создавать еще большее количество невулканического аэрозоля и тем самым сдерживать глобальное потепление. Сторонники такого подхода были и в России, хотя модельные расчеты показывали, что это потребует непрерывного и все более нарастающего выброса  $\text{SO}_2$  в стратосферу, а любая остановка этого процесса вызовет скачкообразное потепление на поверхности Земли.

Если же говорить об уже замеченном росте содержания фоновых аэрозолей, то его антропогенная природа ставилась под сомнение [25], в качестве причины могли выступать извержения вулканов средней мощности, произошедшие в начале XXI в. (Рабаул, Касаточи, пик Сарычева, Эйяфьядлайокюдль, Набро). Следующее десятилетие оказалось более вулканически спокойным, и анализ тренда стратосферного аэрозоля мог дать ответ на этот вопрос.

Еще в начале 2010-х гг. на основе разных наблюдательных методов (аэростатное, удаленное лидарное и спутниковое зондирование) было отмечено некоторое уменьшение оптической толщины стратосферного аэрозоля [26, 27]. С 2011 г. начались регулярные широкоугольные измерения интенсивности и поляризации фона сумеречного неба в Подмоскowie. Разработанная методика [28] позволяет выделять эффект аэрозольного рассеяния в стратосфере и определять профиль и вертикальную оптическую толщину аэрозоля выше 15 км. Усредненные по годам результаты показаны на рис. 2 в сравнении с данными обзора [27]. Видны неплохое согласие (с небольшим сдвигом сумеречных данных вниз за счет превышения нижней границы интегрирования, 15 км, над тропопаузой) и уверенный негативный тренд, указывающий на вероятную вулканическую природу максимума содержания аэрозоля вблизи 2010 г. и подтверждающий оптимистичные выводы работы [25].

Данные 2019 г., приведенные на рис. 2, усреднены по периоду времени, охватывающему май и июнь. В последующие месяцы на территории России начали наблюдаться эффекты «пурпурных зорь», характерные для поствулканических периодов повышенного содержания аэрозоля. Высказывались предположения о связи этих явлений с извержением вулкана Райкоке на Курильских островах в июне 2019 г.

К сожалению, сложные погодные условия лета 2019 г. в Центральной России ограничили объем наблюдательных данных. На

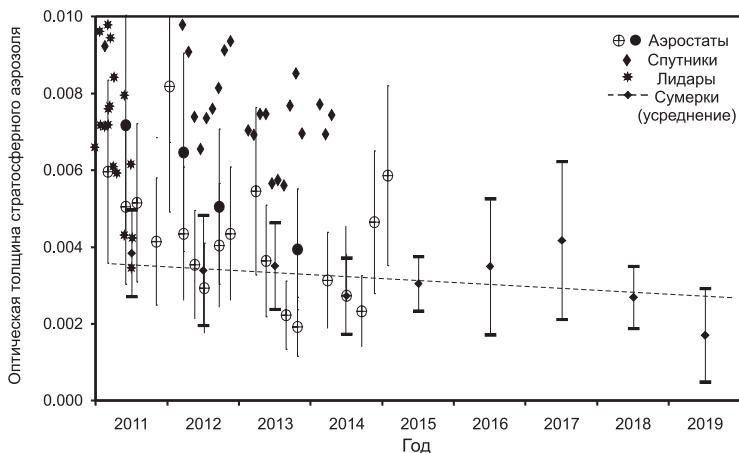


Рис. 2. Вертикальная оптическая толщина стратосферного аэрозоля выше 15 км на длине волны 540 нм по данным поляриметрии сумеречного неба в сравнении с обзором [27]

рис. 3 показаны высотные профили отношения аэрозольного и молекулярного ослабления на длине волны 540 нм в утренние сумерки 10 и 12 сентября в сравнении с усредненными данными на период с 2011 до начала лета 2019 г. Усиление аэрозольной компоненты очевидно, правда, оно больше выражено для верхней тропосферы (10 км), хотя и может задевать нижнюю стратосферу (необходимо еще раз отметить, что на рис. 3 показано отношение коэффициента аэрозольного рассеяния к молекулярному, а плотность воздуха на высоте 10 км примерно вдвое больше, чем на 15 км). Этот результат наглядно подтверждается эффектами резких теней от облаков и инверсионных следов самолетов, наблюдавшихся на фоне «пурпурных зорь» осенью 2019 г. Поэтому сумеречные эффекты 2019 г. следует считать скорее тропосферными, а их связь с вулканом Райкоке нуждается в дополнительной проверке.

Подводя итог сказанному в трех частях, можно сделать вывод, что ситуация с трендами параметров средней атмосферы в настоящее время внушает сдержанный оптимизм. Тем не менее все может быстро и кардинально измениться при отсутствии контроля за выбросами серосодержащих и галогеносодержащих соединений, а температурные изменения за счет парниковых газов и сейчас остаются весьма значительными. В следующей части будет рассмотрен один

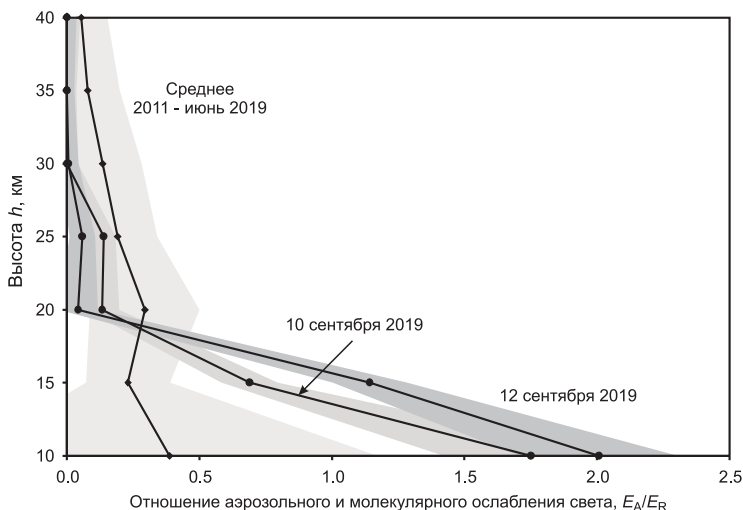


Рис. 3. Вертикальный профиль отношения аэрозольного и молекулярного ослабления в сентябре 2019 г. в сравнении с усредненным профилем с 2011 до начала лета 2019 г. по данным поляриметрии сумеречного неба

из самых неоднозначных и в то же время красивых эффектов, связанных с этим процессом.

## Романтическое предупреждение

Короткие светлые ночи северных широт всегда считались одним из самых красивых и романтических моментов всего года. Казалось бы, это в равной степени было раньше, есть сейчас и останется в будущем. Но с конца XIX в. сначала редкими эпизодами, а потом все чаще и чаще красота летних северных ночей стала переходить на совершенно иной уровень. Вид неба существенно менялся, когда на фоне зари или даже на всем северном сегменте неба появлялись сияющие кружевные облака.

«Ночные светящиеся» или «серебристые» облака, как их называли на разных языках мира, были впервые обнаружены в 1885 г. [29] и казались поначалу тоже связанными с извержением вулкана Кракатау в 1883 г. Но высота облаков, определенная по условиям освещения Солнцем в сумерки (82 км), существенно превосходила известную нам сейчас высоту слоя вулканической пыли. Более того, серебри-

стые облака потом наблюдались и в вулканически спокойные периоды. Особенно выделялись аномально светлые ночи в Европе в конце июня — начале июля 1908 г., несомненно, связанные с Тунгусским явлением, а точнее — с выпадением в атмосферу пыли из головы и хвоста кометы, которой, вероятно, и являлось Тунгусское тело. Но чаще всего облака появлялись совершенно неожиданно.

Еще в начале XX в. было высказано предположение, что серебристые облака состоят из мельчайших частиц водяного льда [30], хотя подтвердить это удалось только целый век спустя в ходе работы орбитальной миссии UARS (Upper Atmosphere Research Satellite [31]). Образование льда в столь разреженной среде требует очень низких температур, что было удивительно, особенно для летних месяцев и круглосуточного освещения мезосферы Солнцем в этот сезон. О том, что именно летом мезосфера самая холодная и что ее температура год от года продолжает уменьшаться, т. е. о всем том, что описано в первой части настоящей работы, стало известно только во второй половине XX в. Серебристые облака — самые молодые в земной атмосфере — стали наглядным подтверждением негативных трендов температур в мезосфере.

Разумеется, на кристаллизацию льда влияют и другие факторы, в частности, содержание водяного пара, рост которого также указывался как возможная причина усиления образования облаков. Помимо этого более плотные и яркие облака могут появиться в период повышенной метеорной активности, создающей в мезосфере обилие ядер конденсации [32]. Самый яркий исторический пример этой связи — Тунгусское событие 1908 г. В настоящее время отмечено частое появление серебристых облаков во второй декаде августа, во время и после максимума активности метеорного потока Персеиды [33, 34], но только вблизи Северного полярного круга, где верхняя мезосфера в августе остается достаточно холодной для кристаллизации льда. Низкие температуры являются необходимым условием, вне зависимости от всех других факторов.

Частота появления серебристых облаков, оцененная на основе их визуальных наблюдений, уверенно возрастала по ходу XX в. [35]. Рост этой частоты вполне могли ощутить простые наблюдатели в средней полосе России в последнее время, особенно в 2018 и 2019 гг. Во второй половине XX в., с началом спутниковых наблюдений, были обнаружены практически круглогодичные полярные мезосферные облака в высоких широтах, поле которых расширялось от года к году [36]. Но при этом температура в слое облаков (82 км) в послед-

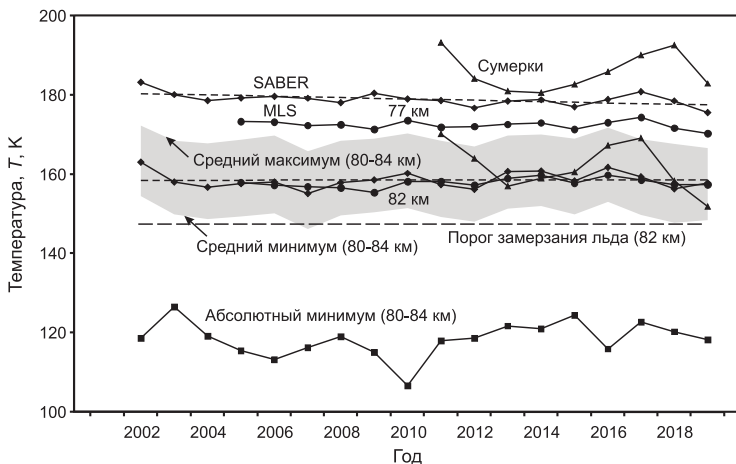


Рис. 4. Температура верхней мезосферы в июне—июле в окрестностях Москвы по спутниковым данным TIMED/SABER, EOS Aura/MLS и по результатам поляриметрии сумеречного неба

ние годы не проявляла сколь угодно заметного негативного тренда. Это видно на примере центральных районов России на рис. 1 и 4, где показаны средние значения температуры в июне и июле по спутниковым данным TIMED/SABER [10], EOS Aura/MLS [37], а также по данным фотометрии и поляриметрии сумеречного неба методом, разработанным автором настоящей работы [38]. Трендов роста содержания водяного пара на высоте 82 км, по данным EOS Aura/MLS, также не обнаруживается. Подобное противоречие, а также ненадежное визуальное определение трендов частоты появления серебристых облаков даже легли в основу вывода о невозможности анализа облаков как индикатора похолодания верхней мезосферы [11].

Путь решения этой проблемы представляется в анализе не частоты визуальных наблюдений облаков, а в измерении их физических характеристик, прежде всего средних размеров ледяных частиц. Знание этого параметра может помочь определить принципиальность фактора, повлиявшего на появление и яркость облаков. В частности, серебристые облака в августе 2015 и 2016 гг., наблюдавшиеся в северных регионах России [33, 34], были достаточно яркими, но состояли из частиц небольших размеров (средний радиус — не более 30 нм), что и позволило сделать выводы о большом числе частиц и вероятной связи с метеорным потоком Персеиды.

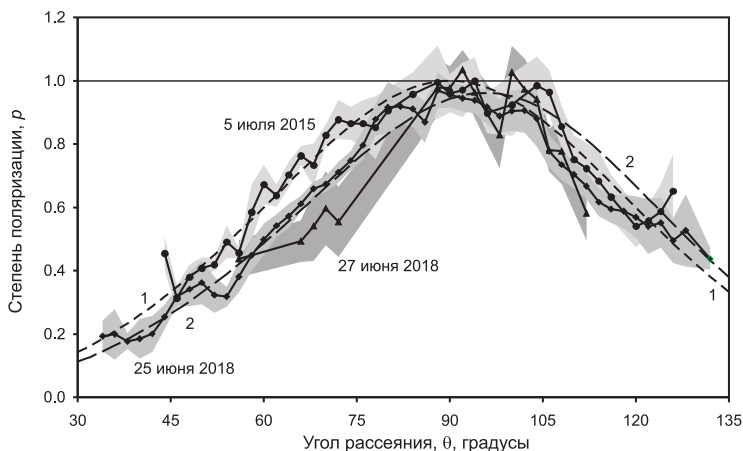


Рис. 5. Степень поляризации света, рассеянного серебристыми облаками, в зависимости от угла рассеяния. Кривая 1 соответствует малым частицам (релеевское рассеяние), кривая 2 — логнормальному распределению со средним радиусом 70 нм и шириной распределения  $\sigma = 1.4$

В настоящее время размер частиц облаков измеряется посредством лидарного зондирования, а также с борта геофизических ракет и искусственных спутников Земли (см. ссылки в [33]). Эффективным способом определения размеров частиц с поверхности Земли является поляризационный анализ поля серебристых облаков на небе, если они занимают на нем большую видимую площадь, т. е. широкий диапазон углов рассеяния. Для этого могут быть использованы данные широкоугольных поляризационных камер, которые уже описывались выше при анализе стратосферного аэрозоля и мезосферных температур. Методика выделения поля облаков и определения поляризации подробно описана в [33, 39].

Ярчайшие серебристые облака за последние годы наблюдались в Центральной России 25—27 июня 2018 г. На рис. 5 показана зависимость степени поляризации облаков от угла рассеяния в сравнении с аналогичными данными для облаков 5 июля 2015 г. и релеевской кривой для очень малых частиц. Видно значимое отличие измеренных значений поляризации от релеевских, что привело к большой величине среднего радиуса — около 70 нм [39], соответствующего кривой 2 на рис. 5.

Как известно, способность малых частиц рассеивать излучение

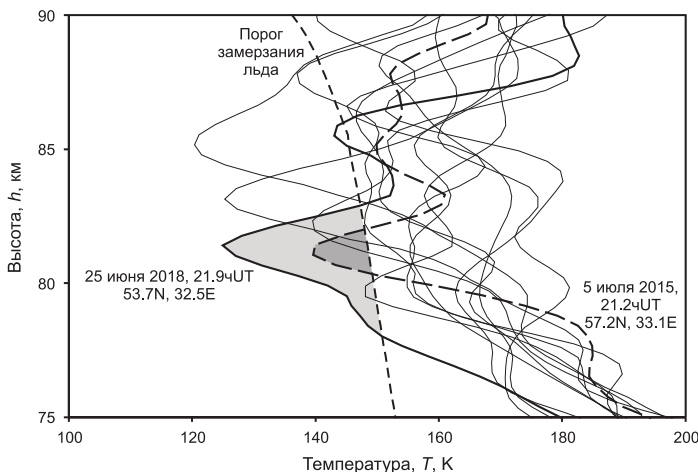


Рис. 6. Температурные профили в верхней мезосфере в окрестностях Москвы в интервале 15–30 июня 2018 г. в сравнении с профилем ночи с серебристыми облаками 5 июля 2015 г. Профиль температуры замерзания льда рассчитан по данным [40]

очень резко возрастает с их средним радиусом (пропорционально  $r^6$ ). Полученное значение радиуса оказалось достаточным для объяснения аномальной яркости облаков и позволило, в частности, отвергнуть гипотезу об увеличении числа частиц и связи облаков с метеоритом Озерки, упавшим в 300 км от Москвы 21 июня 2018 г.

Чтобы понять возможную причину роста размеров частиц, необходимо подробно рассмотреть тепловую структуру верхней мезосферы в это время. Здесь нужно отметить, что общеизвестное представление мезосферы Земли как слоя с монотонным уменьшением температуры до минимума в мезопаузе является сильно упрощенным. Через мезосферу проходят и разрушаются акустико-гравитационные волны, вызванные возмущениями (неоднородными ветрами, циклонами, грозами и т. д.) в нижней атмосфере и увеличивающие свою амплитуду в ее верхних слоях. Они проявляются как колебания температуры в несколько десятков градусов, видимые на рис. 6. В результате таких перепадов выше и ниже температуры замерзания льда, также показанной на рис. 6, серебристые облака сами приобретают волновой узор.

Мы видим, что температура верхней мезосферы в летний период достаточно часто падает ниже 140 К, но облака появляются в тот



момент, когда эти минимумы опускаются существенно ниже «традиционной» мезопаузы, до высот 80—82 км. Это связано с тем, что на меньших высотах существенно выше концентрация водяного пара, и частицы по мере дрейфа через этот слой могут вырастать до размеров в 50 нм и больше [41]. Вследствие резкой зависимости коэффициента рассеяния от радиуса именно размер является принципиальным для появления визуальных облаков. Это хорошо видно для профиля вечера ярких облаков 25 июня 2018 г., когда слой с низкой температурой был особенно широким, что важно для роста частиц [42], а его нижняя граница опустилась до высоты в 78 км, наименьшей для всех профилей на рис. 6.

Найденное обстоятельство позволяет снять противоречие между трендами температуры и частоты появления серебристых облаков, описанное выше. Хотя средняя летняя температура в «стандартном» слое облаков (82 км) сейчас примерно постоянна, она уменьшается под этим слоем (негативные тренды температур на меньших высотах видны на рис. 1 и 4), все чаще создавая там условия для появления облаков с крупными частицами. Это можно трактовать как смещение постоянной по температуре мезопаузы на меньшие высоты, более богатые водяным паром. Если этот процесс продолжится в будущем, мы можем ожидать все более частого появления ярких серебристых облаков летними ночами. И хотя это очень красивое явление, необходимо помнить, что это фактическое следствие обогащения атмосферы парниковыми газами, описанного в первой части настоящей работы.

## Заключение

Человечество вступило в эпоху, когда его воздействие на атмосферу способно вызывать существенное изменение ее характеристик за время, значительно меньшее периода естественной релаксации этих свойств. Это привело не только к макроскопическим изменениям в различных слоях атмосферы, но даже к появлению в ней качественно новых или ненаблюдаемых ранее объектов вроде серебристых облаков.

Все эти обстоятельства делают необходимым контроль состояния атмосферы, включая ее верхние слои, а также развитие моделей, которые могли бы предсказать эволюцию атмосферы в будущем в зависимости от сценария различных естественных и антропогенных воздействий. Наряду с новыми возможностями, появившимися на

рубеже тысячелетий (прежде всего непрерывным спутниковым мониторингом атмосферы), актуальность сохраняют и локальные наземные методы.

Автор работы выражает благодарность И. А. Маслову (ИКИ РАН) за плодотворное 20-летнее сотрудничество, создание приборов и поляризационный обзор фона неба и А. Г. Феофилову (Лаборатория динамической метеорологии, Университет Сорбонна, Франция) за ценные замечания, предоставление доступа и помощь с анализом спутниковых данных о составе атмосферы миссии TIMED/SABER.

## Библиографические ссылки

1. *Fourier J.* Memoire sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires // Memoires de l'Academie royale des sciences de l'Institut de France. — 1827. — Vol. 7. — P. 570.
2. *Tyndall J.* On the Absorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours... // Philosophical Magazine. — 1861. — Vol. 22. — P. 169.
3. *Arrhenius S.* On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground // Philosophical Magazine and Journal of Science. — 1896. — Vol. 41. — P. 237.
4. *Houghton J. T.* Absorption and emission by carbon dioxide in the mesosphere // Quart. J. Royal Met. Soc. — 1970. — Vol. 96. — P. 767.
5. *Roble R. G., Dickinson R. E.* How will changes in carbon dioxide and methane modify the mean structure of the mesosphere and thermosphere? // Geophys. Res. Lett. — 1989. — Vol. 16. — P. 1441.
6. *Kokin G. A., Lysenko E. V.* On temperature trends of the atmosphere from rocket and radiosonde data // J. Atmos. Terr. Phys. — 1994. — Vol. 56. — P. 1035.
7. *Lubken F.-J., Berger U., Baumgarten G.* Temperature trends in the mid-latitude summer mesosphere // J. Geophys. Res. — 2013. — Vol. 118. — P. 13347.
8. *Yuan T., Solomon S. C., She C.-Y. et al.* The Long-Term Trends of Nocturnal Mesopause Temperature and Altitude Revealed by Na Lidar Observations Between 1990 and 2018 at Midlatitude // J. Geophys. Res. — 2019. — Vol. 124. — P. 5970.
9. *Qian L., Burns A. G., Solomon S. C., Wang W.* Carbon dioxide trends in the mesosphere and lower thermosphere // J. Geophys. Res. Space Phys. — 2017. — Vol. 122. — P. 4474.
10. *Russell J. M., Mlynczak M. G., Gordley L. L. et al.* An overview of the SABER experiment and preliminary calibration results // Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. — 1999. — Vol. 3756. — P. 277.

11. *Danilov A. D.* Long-term trends in upper atmosphere and ionosphere (review) // *Geomagnetism and aeronomy*. — 2012. — Vol. 52. — P. 291.
12. *Farman J. C., Gardiner B. G., Shanklin J. D.* Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction // *Nature*. — 1985. — Vol. 315. — P. 207.
13. *Molina M. J., Rowland F. S.* Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone // *Nature*. — 1974. — Vol. 249. — P. 810.
14. *Akmaev R. A., Fomichev V. I., Zhu X.* Impact of middle-atmospheric composition changes on greenhouse cooling in the upper atmosphere // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* — 2006. — Vol. 68. — P. 1879.
15. *Humphreys W. J.* *Physics of the Air*. — Philadelphia : Franklin Institute of the State of Pennsylvania, 1920.
16. *Clark J. E.* The remarkable sunsets // *Nature*. — 1883. — Vol. 29. — P. 130.
17. *Junge C. E., Changnon C. W., Manson J. E.* Stratospheric aerosols // *J. Meteorol.* — 1961. — Vol. 18. — P. 81.
18. *Rosen J. M.* The boiling point of stratospheric aerosols // *J. Appl. Meteorol.* — 1971. — Vol. 10. — P. 1044.
19. *Deshler T., Hervig M. E., Hofmann D. J. et al.* Thirty years of in situ stratospheric aerosol size distribution measurements from Laramie, Wyoming (41 N), using balloon-borne instruments // *J. Geophys. Res.* — 2003. — Vol. 108. — P. D54167.
20. *Deshler T., Anderson-Sprecher R., Jager H. et al.* Trends in the nonvolcanic component of stratospheric aerosol over the period 1971-2004 // *J. Geophys. Res.* — 2006. — Vol. 111. — P. D01201.
21. *Solomon S., Daniel J. S., Neely R. R. et al.* The persistently variable “background” stratospheric aerosol layer and global climate change // *Science*. — 2011. — Vol. 333. — P. 866.
22. *Lu Z., Streets D. G., Zhang Q. et al.* Sulfur dioxide emissions in China and sulfur trends in East Asia since 2000 // *Atm. Chem. Phys.* — 2010. — Vol. 10. — P. 6311.
23. *Crutzen P. J.* The possible importance of CSO for the sulfate layer of the stratosphere // *Geophys. Res. Lett.* — 1976. — Vol. 3. — P. 73.
24. *Aydin M., Fudge T. J., Verhulst K. R. et al.* Carbonyl sulfide hydrolysis in Antarctic ice cores and an atmospheric history for the last 8000 years // *J. Geophys. Res.* — 2014. — Vol. 119. — P. 8500.
25. *Neely R. R., Toon O. B., Solomon S. et al.* Recent anthropogenic increases in SO<sub>2</sub> from Asia have minimal impact on stratospheric aerosol // *Geophys. Res. Lett.* — 2013. — Vol. 40. — P. 999.

26. *Ridley D. A., Solomon S., Barnes J. E. et al.* Total volcanic stratospheric aerosol optical depths and implications for global climate change // *Geophys. Res. Lett.* — 2014. — Vol. 41. — P. 7763.
27. *Kremser S., Thomason L. W., von Hobe M. et al.* Stratospheric aerosol — Observations, processes, and impact on climate // *Reviews of Geophysics.* — 2016. — Vol. 54. — P. 278.
28. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Optical depth and altitude profiles of stratospheric aerosol based on multi-year polarization measurements of the twilight sky // *Journal of Aerosol Science.* — 2019. — Vol. 127. — P. 93.
29. *Leslie R. C.* Sky Glows // *Nature.* — 1885. — Vol. 32. — P. 245.
30. *Wegener A.* Die Erforschung der obersten Atmosphärenschichten // *Gerl. Beitrage Geophys.* — 1912. — Vol. 11. — P. 102.
31. *Hervig M., Thompson R. E., McHugh M. et al.* First confirmation that water ice is the primary component of polar mesospheric clouds // *Geophys. Res. Lett.* — 2001. — Vol. 28. — P. 917.
32. *Hunten D. M., Turco R. P., Toon O. B.* Smoke and dust particles of meteoric origin in the mesosphere and stratosphere // *J. Atmos. Sci.* — 1980. — Vol. 37. — P. 1342.
33. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A., Kozelov B. V., Dlugach J. M.* Noctilucent cloud polarimetry: Twilight measurements in a wide range of scattering angles // *Plan. Space Sci.* — 2016. — Vol. 125. — P. 105.
34. *Ugolnikov O. S., Galkin A. A., Pilgaev S. V., Roldugin A. V.* Noctilucent cloud particle size determination based on multi-wavelength all-sky analysis // *Plan. Space Sci.* — 2017. — Vol. 146. — P. 10.
35. *Thomas G. E., Olivero J.* Noctilucent clouds as the possible indicators of global change in the mesosphere // *Adv. Space Res.* — 2001. — Vol. 28. — P. 937.
36. *DeLand M. T., Shettle E. P., Thomas G. E., Olivero J. J.* Latitude-dependent long-term variations in polar mesospheric clouds from SBUV version 3 PMC data // *J. Geophys. Res.* — 2001. — Vol. 112. — P. D10315.
37. *Schwartz M. J., Lambert A., Manney G. L. et al.* Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements // *J. Geophys. Res.* — 2008. — Vol. 113. — P. D15S11.
38. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Summer mesosphere temperature distribution from wide-angle polarization measurements of the twilight sky // *J. Atmos. Terr. Phys.* — 2013. — Vol. 105. — P. 8.
39. *Ugolnikov O. S., Maslov I. A.* Polarization analysis and probable origin of bright noctilucent clouds with large particles in June 2018 // *Plan. Space Sci.* (in press). — 2019.

40. *Murphy D. M., Koop T.* Review of the vapour pressures of ice and supercooled water for atmospheric applications // Quart. J. Royal Meterol. Soc. — 2005. — Vol. 131. — P. 1539.
41. *Rusch D., Thomas G., Merkel A. et al.* Large ice particles associated with small ice water content observed by AIM CIPS imagery of polar mesospheric clouds: evidence for microphysical coupling with small-scale dynamics // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. — 2017. — Vol. 162. — P. 97.
42. *Feofilov A. G., Petelina S. V.* Relation between mesospheric ice clouds, temperature, and water vapor determined from Odin/OSIRIS and TIMED/SABER data // J. Geophys. Res. — 2010. — Vol. 115. — P. D18305.